青海湖东沙地不同植被恢复措施下土壤水分变化特征

汪海娇[1]， 田丽慧[1,2]， 张登山[1]， 王俏雨[1]

（1. 青海大学 省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室，农林科学院，青海 西宁 810016；
2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室，北京 100875）

摘 要：土壤水分是沙地植被格局和过程改变的主要驱动力，也是干旱半干旱区植物生长最大的限制因子。沙漠地区的土壤水分表现出明显的空间异质性。以高寒半干旱沙地青海湖东沙地为研究区，以栽植人工固沙植物（小叶杨、樟子松、沙棘和乌柳）的沙丘和自然固定沙丘（沙蒿为优势种）作为研究样地，探讨不同固沙植物影响下的沙丘不同地貌部位土壤水分变化特征。结果表明：（1）土壤水分的季节变化受降水、植被蒸腾作用和地表蒸发的共同影响，不同物种的分布模式具有差异性，但都表现为7月的土壤含水量最高。（2）同一植物在不同地貌部位的土壤含水量具有差异性，小叶杨在迎风坡最高，樟子松、沙棘和乌柳在背风坡最高，而沙蒿在丘顶最高，但只有乌柳的土壤含水量在沙丘地貌部位间的差异明显（$P<0.05$）。不同植物在同一地貌部位的土壤含水量也具有差异性，迎风坡樟子松的土壤含水量最小，只有1.81%，而沙蒿的土壤含水量能达到3.48%。丘顶处乌柳的土壤含水量仅为1.82%，而沙蒿可达3.58%。背风坡处的土壤含水量相差不大，乌柳最大为3.41%。（3）土壤水分随着土层深度的变化模式不同，土壤含水量整体表现为10~20 cm处最高。不同植物的土壤水分的垂直分布具有差异性，小叶杨和樟子松下方的土壤含水量随着土层深度的增加而降低，沙棘和沙蒿表现为120 cm土层深度内无明显变化，而乌柳下方的土壤含水量随着土层深度的变化在各地貌部位不同，具体表现为迎风坡无明显变化、丘顶降低和背风坡增加的趋势。土壤水分在高寒半干旱沙地不同植被恢复措施下的分布除受到降水、土壤分布、物种类型、植物根系分布的影响之外，还与沙丘微地貌形态具有一定的相关性。

关键词：高寒半干旱沙地；固沙植物；土壤水分；季节变化；垂直分布；青海湖

土地沙漠化问题是当前全球面临的主要环境问题之一，沙漠化地区的生态环境特征及其演变趋势不仅严重影响生态系统的稳定性，也日益威胁人类的生产生活和区域的可持续发展[1-2]。通过人工措施来保护、恢复、改造、建设植被是防治土地沙漠化最有效、最经济、最持久、最稳定的措施，也是改造利用沙漠化土地的重要途径[3]。利用人工植被进行沙害防治在我国已有60多年的历史，实践证明，植物固沙能够有效遏制沙漠化发展、减轻风沙危害和促进沙地植被恢复[4]。在沙漠地区，水分是植物存活与生长的最重要限制因子[5]，水文过程决定土壤—植被系统的演化方向和生态功能[6]，而人工植被的建立改变了原来沙丘的水量平衡和土壤水分的空间分布格局[7]。土壤水分是沙地植被格局和过程改变的主要驱动力[8-9]，是诸多生态过程的主要制约因子，也是沙区退化生态系统恢复与重建的重要依据[10-11]。土壤水分的多少关乎着沙地植被的生长状况，直接影响着沙漠化地区的风沙活动[12]。沙漠地区的土壤水分表现出明显的空间异质性，例如，地形引起土壤水分的异质性分布，Pan等[13]对沙坡头地区人工植被固定沙地的研究表明，土壤水分含量表现为：丘间地>背风坡>迎风坡；朱玉伟等[14]研究了古尔班通古特沙漠南缘半固定沙丘水分的时空分布特征，认为土壤水分含量丘间地>丘顶>背风坡>迎风坡。在不同的区域，坡度、坡向、植被和土壤的机械组成等都可能影响土壤水分在不同地貌部位的变化，所以，不同的研究者得出来的结论并不一致。因此，在对土壤水分的研究中，需要综合

收稿日期：2020-05-07； **修订日期：**2020-08-03
基金项目：国家自然科学基金（41961017，41661001）；青海三江源生态保护和建设二期（2018-S-1）；青海省重大科技专项（2018-NK-A3）；地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金资助项目（2020-KF-06）资助
作者简介：汪海娇（1993-），女，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治. E-mail: 1120407098@qq.com
通讯作者：田丽慧. E-mail: lhtian@qhu.edu.cn

考虑局地地形、植被结构、根系分布与形态以及土壤理化性质的共同作用。

高寒地区的土地沙漠化是青藏高原生态脆弱性的典型体现,已有的生态恢复工程促进沙化土地明显好转,但系统对高寒沙地生态系统植物水分间关系的研究比较薄弱。鲁瑞洁等[15]对青海湖东沙地土壤水分在不同沙丘类型的变化特征进行了分析;王俏雨等[16]对共和盆地不同固沙年限柠条群落土壤水分的空间分布特征进行了分析,李少华等[17]对不同植被恢复区的土壤水分进行了对比。但这些研究只是针对不同沙丘的土壤水分特征进行了对比,并未深入探讨不同固沙植物在不同地貌部位上对土壤水分时空变化的响应及反馈机制。因此,本文针对不同的固沙植物,在分析植被生长特征的基础上,探讨不同地貌部位土壤水分的空间异质性特征,以期为高寒沙地人工物种的合理栽植提供一定的理论依据。

1 研究区概况

青海湖东克土沙地位于100°47′~100°50′E,36°47′~36°50′N,海拔3176~3340 m,处于我国东部季风区、西北干旱区和西南高寒区的交汇地带,属于高原半干旱高寒气候区,具有干寒、少雨、多风、太阳辐射强烈、气温日较差大的气候特点[18],是高寒半干旱典型生态脆弱区。年均气温为0.7 ℃,年均降水量约370 mm,年均风速约4.5 m·s^{-1}。2007年起,流动沙丘进行了大面积的麦草方格沙障铺设与生物造林工程[19-20],至2016年,已形成近100 hm^{2}的防沙治沙试验示范区,引进数10种固沙植物,涉及胡颓子科、菊科、豆科、蔷薇科、杨柳科等12科23属[21],与其他自然植被共计有27科58属71种[22]。2008—2017年,各林地形成了以人工植被为主的植被群落,大面积流动沙丘逐渐转化成半固定或固定沙丘[21]。

2 研究方法

2.1 试验样地选择

在青海湖东克土防沙治沙试验示范区,选择栽植小叶杨(*Populus simonii*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和乌柳(*Salix cheilophila*)的人工半固定沙丘(包含迎风坡、丘顶、背风坡),同时,选择一个自然固定沙丘作为样地进行标记(图1,表1)。在选定的样地中,设置3个(10 m×10 m)固定样方,总计36个样方。在选定的样方内,调查乔木和灌木的高度、冠幅,计算盖度和丰富度(表2)。

小叶杨和沙棘(图1a)栽植在同一个沙丘,标记为XYY-SJ,该沙丘在2016年补植了樟子松,樟子松盖度不足2%,优势种为小叶杨和沙棘。栽植樟子松的沙丘(图1b)标记为ZZS,2012年在该沙丘补植了沙地柏(*Sabina vulgaris*),樟子松为优势种。栽植乌柳的沙丘(图1c)标记为WL,2010年混播柠条(*Caragana korshinskii*)和花棒(*Hedysarum scoparium*),优势种为乌柳。以上3个人工固沙的沙丘上自然植被逐渐恢复,主要有冰草(*Agropyron cristatum*)、赖草(*Leymus secalinu*)和密花棘豆(*Oxytropis imbricata*)等。自然固定沙丘(图1d)标记为SH,优势种为沙蒿(*Artemisia desertorum*),2010年该沙丘丘顶出现微侵蚀状态,当年补栽了沙棘、金露梅(*Potentilla fruticosa*)和樟子松,该沙丘自然植被较为丰富,常见的有刺叶柄棘豆(*Oxytropis aciphyila*)、赖草、密花棘豆、镰形棘豆(*Oxytropid falcata*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、早熟禾(*Poa annua*)、冰草等。

2.2 土壤水分测定

土壤水分采用烘干法测定。2018年5—10月,每月中旬在选定的固定样方内用土钻(AMS,USA)人工取样。XYY-SJ样方内,在小叶杨和沙棘下方分别取样,共计取样点45个。小叶杨下方的取样深度为200 cm,分9个层次,即0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~150 cm、150~200 cm,每层分别采集3个样品。其余样点取样深度为150 cm,层次参照小叶杨的取样深度,只取前8层。

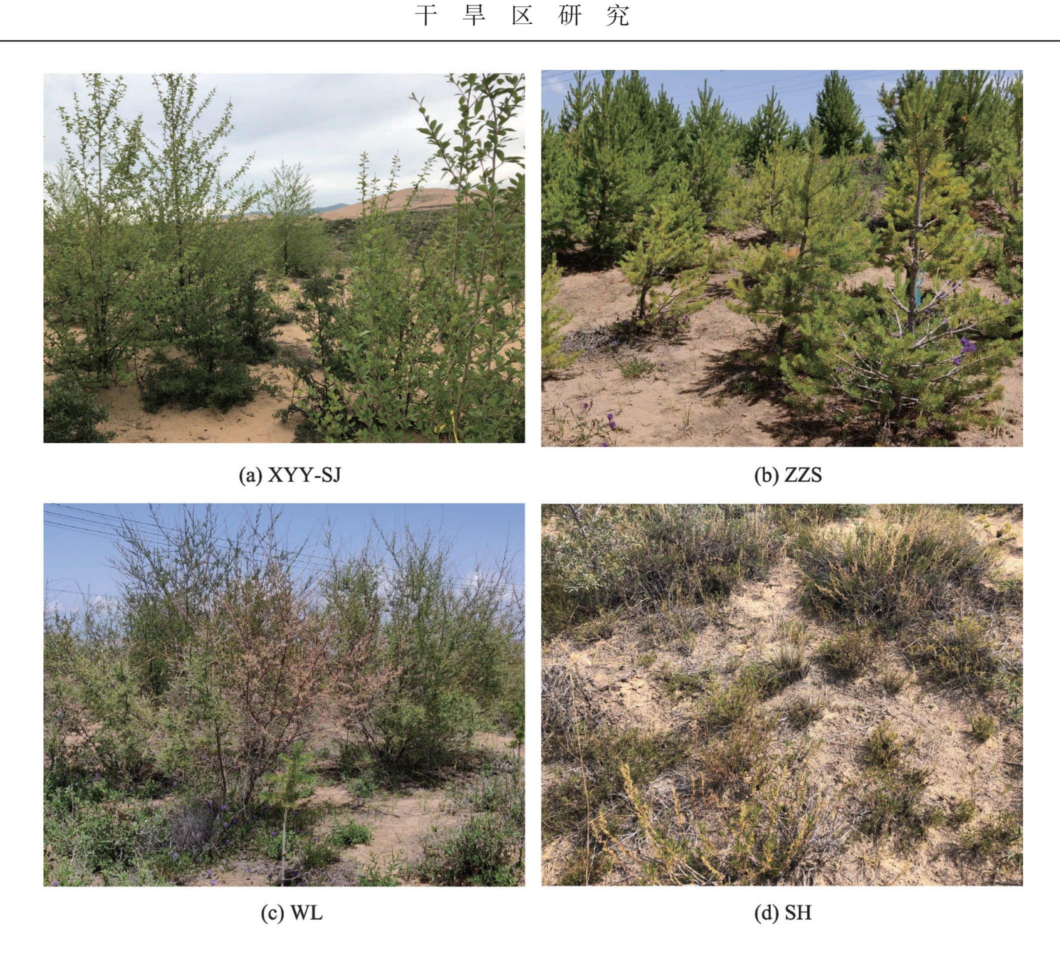
样品带回室内用百分之一电子天平先称湿重g_1(g),然后置于105 ℃烘箱内烘干至恒重,待冷却后称其干重g_2(g)。利用公式计算各层土样的土壤重量含水量M(%),计算公式为:

$$M(\%)=(g_1-g_2)/(g_2-g_0)\times 100 \tag{1}$$

式中:M为重量含水量(%);g_0为铝盒重;g_1为铝盒重+湿土重;g_2为铝盒重+烘干土样重。

2.3 数据分析

不同植物在同一地貌部位的土壤含水量的差异性以及同一植物在不同地貌部位的土壤含水量



(a) XYY-SJ　(b) ZZS　(c) WL　(d) SH

图1　试验样地概况示意图

Fig. 1　The photos of study sites in Ketu sandy land at eastern shore of Qinghai Lake

表1　试验样地基本概况

Tab. 1　Features of study sites in Ketu sandy land at eastern shore of Qinghai Lake

编号	样地类型	位置	海拔/m	优势种	人工措施	栽种时间
XYY-SJ	半固定沙丘	36°47′N，100°47′E	3233	沙棘、小叶杨	麦草沙障+实生苗	2010年
ZZS	半固定沙丘	36°47′N，100°46′E	3223	樟子松	麦草沙障+实生苗	2009年
WL	半固定沙丘	36°47′N，100°46′E	3226	乌柳	麦草沙障+实生苗	2009年
SH	固定沙丘	36°47′N，100°47′E	3229	沙蒿	-	-

的差异性在SPSS 17（SPSS Inc.，Chicago，IL，USA）中采用单因素方差分析（one-way ANOVA）中的LSD比较法进行两两比较。

3　结果与分析

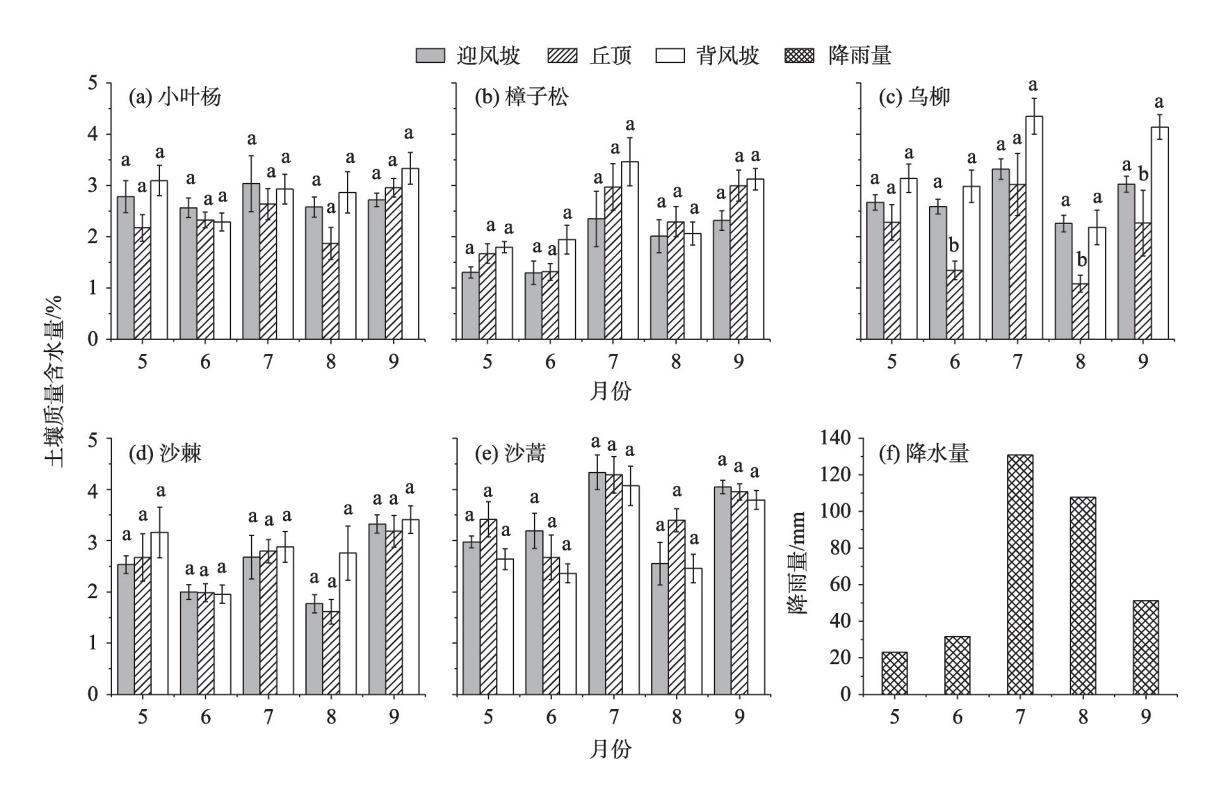
3.1　土壤水分的季节分配

土壤含水量随着季节变化呈现波动变化，7月土壤含水量最高（图2）。生长季初期的5月，植物对土壤水分的消耗较少，土壤含水量大都维持在3%的水平。由于樟子松是常绿乔木，全年耗水量大于其他植物，此时土壤含水量最低。进入6月，降水增多，植物开始快速生长，各群落的土壤含水量都出现极低值。乔木在生长季初期的需水量大，小叶杨的土壤含水量维持在2.19%~2.68%之间，樟子松的需水量最大，土壤含水量也最小，迎风坡处的土壤含水量只有1.26%。进入降水量最高的7月（130.80 mm），各群落的土壤含水量也达到最高值，灌木下方（乌柳、沙棘和沙蒿）的土壤含水量大于乔木（小叶杨和樟子松）。生长旺盛季的8月，虽然降水量为全年次高值（107.60 mm），但此时土壤含水量出现全年最低值（樟子松为全年极低值）。生长末期9月的降水量（51.2 mm）仍能满足植物的生长，此时，土壤含水量又开始上升，出现生长季的次高值，

表2 试验样地植被特征(平均值±标准误)

Tab. 2 Characteristics of vegetation in study sites (Mean±SE)

样地	部位	植物	高度/m	南北长/cm	东西长/cm	盖度/%	丰富度
XYY-SJ	迎风坡	小叶杨(乔木)	146.43±96.57	103.79±88.81	98.79±81.43	23.59±2.70	8
	丘顶		131.87±58.96	93.60±43.88	86.80±42.38	14.60±1.23	7
	背风坡		197.31±130.62	118.63±73.20	108.69±67.74	27.46±1.89	7
ZZS	迎风坡	樟子松(乔木)	121.63±36.39	88.31±29.48	90.38±23.57	54.06±1.81	4
	丘顶		122.33±30.36	84.11±18.81	78.78±18.19	24.39±1.07	5
	背风坡		103.12±29.60	73.71±19.22	74.82±18.28	39.59±1.12	4
WL	迎风坡	乌柳(半乔木)	155.50±56.97	123.25±54.96	115.5±52.67	51.81±4.70	6
	丘顶		210.83±25.77	168.67±13.44	126.67±29.79	51.41±2.19	6
	背风坡		186.57±48.50	147.57±40.26	112.57±51.42	49.82±3.93	8
XYY-SJ	迎风坡	沙棘(灌木)	41.44±14.45	61.88±26.01	73.06±28.70	8.12±0.44	8
	丘顶		69.49±26.36	99.45±37.91	96.26±36.02	49.70±0.69	7
	背风坡		61.91±34.09	83.11±34.30	79.93±27.36	32.23±0.49	7
SH	迎风坡	沙蒿(半灌木)	25.82±9.25	40.20±21.93	37.39±20.98	33.32±0.95	9
	丘顶		32.88±12.04	43.84±18.37	41.00±15.31	25.70±0.59	6
	背风坡		26.77±9.59	49.00±19.42	52.90±19.21	22.90±0.90	5



注:同字母表示同一植物在不同地貌部位之间无显著差异(P>0.05),不同字母表示有显著差异(P<0.05)。

图2 不同植物在不同沙丘地貌部位土壤含水量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of soil moisture content of different species at different positions of dune

灌木下方的土壤含水量甚至与7月持平。

3.2 土壤水分在沙丘地貌部位的差异性特征

同一种植物在沙丘不同地貌部位的土壤含水量具有差异性,除乌柳丘顶的土壤含水量与迎风坡和背风坡的差异明显之外(P<0.05),其他植物在地貌部位间的差异不明显(P>0.05)(图2,表3)。小叶杨在迎风坡的土壤含水量相对较高,土壤含水量维持在2.03%~2.92%。樟子松在背风坡的土壤含水量最高,迎风坡的土壤含水量最低。乌柳在背风坡的土壤含水量最高,7月和9月背风坡的土壤含水量在

表3 固沙植物在不同地貌部位土壤含水量的差异性特征

Tab. 3 Features of soil moisture content at different positions of dune

植被类型	沙丘地貌部位	土壤质量含水量/%
小叶杨	迎风坡	2.71±0.16[aA]
	丘顶	2.41±0.15[aA]
	背风坡	2.58±0.14[aA]
樟子松	迎风坡	1.81±0.20[aB]
	丘顶	2.33±0.30[aA]
	背风坡	2.42±0.24[aA]
乌柳	迎风坡	2.78±0.18[aA]
	丘顶	1.82±0.32[bB]
	背风坡	3.41±0.38[aB]
沙棘	迎风坡	2.46±0.23[aA]
	丘顶	2.55±0.25[aA]
	背风坡	2.97±0.29[aA]
沙蒿	迎风坡	3.48±0.28[aC]
	丘顶	3.53±0.24[aC]
	背风坡	3.09±0.31[aA]

注：同一小写字母表示同一植物在不同地貌部位之间无显著差异（$P>0.05$），不同小写字母表示具有显著差异（$P<0.05$）；同一大写字母表示不同植物在同一地貌部位无显著差异（$P>0.05$），不同大写字母表示具有显著差异（$P<0.05$）。

4%以上，而丘顶的土壤含水量生长季始终处于最低的状态，8月丘顶的土壤含水量仅为0.99%。丘顶生长季的土壤含水量只有1.82%，而背风坡能达到3.42%。沙棘在背风坡的土壤含水量最高，迎风坡和丘顶的土壤含水量相当。沙蒿在各部位的土壤含水量的变化没有明显规律，整体表现为：背风坡的土壤含水量最低，迎风坡和丘顶的土壤含水量较高；土壤含水量的季节差异不明显，7月的土壤含水量最高，可达3.89%~4.25%，8月的土壤含水量最低。自然固定沙丘的土壤含水量最高，始终维持在3%以上。

不同植物在同一地貌部位的土壤含水量也具有差异性，但无明显的规律性（图2，表3）。迎风坡处，樟子松下方的土壤含水量最小，只有1.81%，而沙蒿下方的土壤含水量能达到3.48%。丘顶处，乌柳下方的土壤含水量最小，只有1.82%，沙蒿最大也能达到3.58%。背风坡处，土壤含水量相差不大，乌柳最大能达到3.41%。

3.3 土壤水分随土层深度的变化特征

对不同植物而言，土壤水分随着土层深度的变化不同（图3）。小叶杨（图3a）土壤含水量随着土层深度的增加呈现先增加后减小的趋势，表层10 cm的土壤含水量较低，10~20 cm处为最大值，20 cm以下波动降低。樟子松下方（图3b）土壤含水量随着土层深度降低，但背风坡随着土层深度先减小后增加，拐点出现在60~80 cm，150 cm深度的土壤含水量最高，为2.86%。乌柳下方（图3c）土壤含水量在3个地貌部位的变化不同，迎风坡的土壤含水量随着深度的增加变化不大，呈现先增加后减小的趋势，表层10 cm的土壤含水量最低，10~20 cm的土壤含水量最高；丘顶的土壤含水量随着深度明显降低，表层10 cm的含水量最高为3.34%，80~100 cm深度的含水量最低仅为1.10%；背风坡的土壤含水量随着深度先增加后减小，40~60 cm土壤含水量最高，为3.99%。沙棘下方（图3d）的土壤含水量在垂直深度上总体变化不大，迎风坡的土壤含水量随着深度先增加后减小再增加，80~100 cm深度土壤含水量最高，为2.91%；丘顶土壤含水量的变化趋势与迎风坡一致，但最高点在40~60 cm，最大值为2.77%；而背风坡表现为明显的先增加再减小的趋势，10~20 cm土壤含水量的最高值为3.59%。自然固定沙丘（图3e）的土壤水分随着深度呈现波动的趋势，迎风坡100~150 cm深度的土壤含水量为4.02%；丘顶的土壤含水量呈现先增加再减小的趋势，10~20 cm的土壤含水量最高，可达4.53%；背风坡的土壤含水量呈现先增加后减少的趋势，60~80 cm最高为3.38%。

对同一地貌部位而言，不同植物的土壤水分随着土层深度的变化模式不同。从图3可知，迎风坡处，小叶杨和乌柳下方土壤水分随土层深度先增加后减小，樟子松逐渐降低，沙棘和沙蒿波动增加。丘顶处，小叶杨下方土壤含水量波动增加，至150~200 cm处达到最大值；沙棘和沙蒿下方的土壤含水量先增加后降低，10~20 cm处最高；乌柳和樟子松下方土壤含水量逐渐减小，樟子松的减小趋势最为明显。背风坡处，小叶杨、沙棘和沙蒿下方都是先增加后减小，但小叶杨和沙棘是10~20 cm处最高，沙蒿是40~60 cm处最高；樟子松下方表现为先增加后减小再增加的趋势，至100~150 cm处达到最大值；乌柳下方土壤含水量随土层深度波动增加，最大值出现在40~60 cm处。

在降水最多的7月，对比不同地貌部位土壤水分的垂直分层差异（图4），不同植物在不同地貌部位对降水的响应层次不同。迎风坡处（图4a），小叶

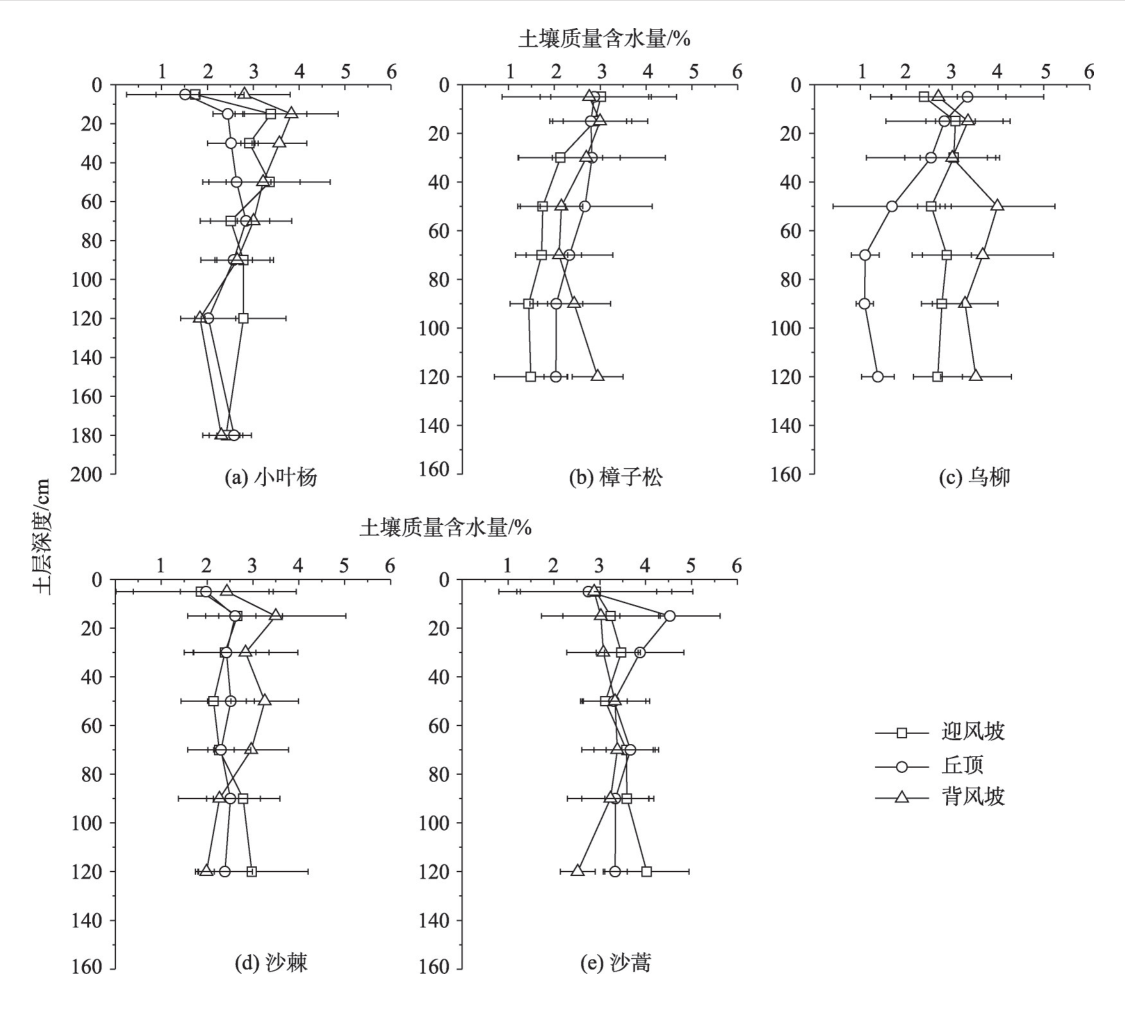


图3 不同植物在不同沙丘地貌部位土壤含水量的垂直变化

Fig. 3 Vertical variation of soil moisture content of different species at different positions of dune

杨和乌柳下方的土壤水分随着土层深度增加，小叶杨在40~60 cm土壤含水量最高，可达6%；樟子松、沙棘和沙蒿的土壤含水量随着土层深度波动减小，樟子松的降低趋势最明显，在100~150 cm的土壤含水量甚至不足1%。丘顶处(图4b)，除沙棘的土壤含水量随深度一直呈降低趋势之外，其他物种的土壤水分随着土层深度呈现先增加再降低的趋势，小叶杨的最高土壤含水量(4%)下移至60~80 cm。背风坡处(图4c)，除樟子松的土壤含水量随着土层深度明显降低之外，其他植物的土壤含水量波动增加，尤其沙棘的增加最为明显(60~80 cm为6%)，小叶杨土壤水分的最高值又下移至80~100 cm，此处土壤含水量不足4%。

整体而言，随着土层深度的增加，小叶杨和沙棘的土壤含水量先增加后减小，10~20 cm土壤水分较高；樟子松的土壤含水量整体表现为减小趋势，但背风坡在80 cm以下土壤水分增多；乌柳的土壤含水量在3个地貌部位的表现各不相同，迎风坡无明显变化，丘顶减少而背风坡波动增加；沙蒿的土壤含水量始终较高，总体呈现波动增加的趋势但增加值不大。

4 讨 论

结合青海湖盆地的具体情况，湖东沙地的治理以生物措施或者机械措施与生物措施相结合为主，土壤水分是研究区植被恢复的主要限制因素之一[23]。干旱、半干旱区地下水一般埋藏较深，大气降水是土壤水分的重要来源，而土壤水分主要依靠降水补给[24]。研究区7月降水最多，土壤含水量也最高。该区丘间地地下水位一般在0.5 m左右，而沙丘高度多数在7 m以上，地下水对沙丘土壤水分的补给不大，降水是本区土壤水分的主要

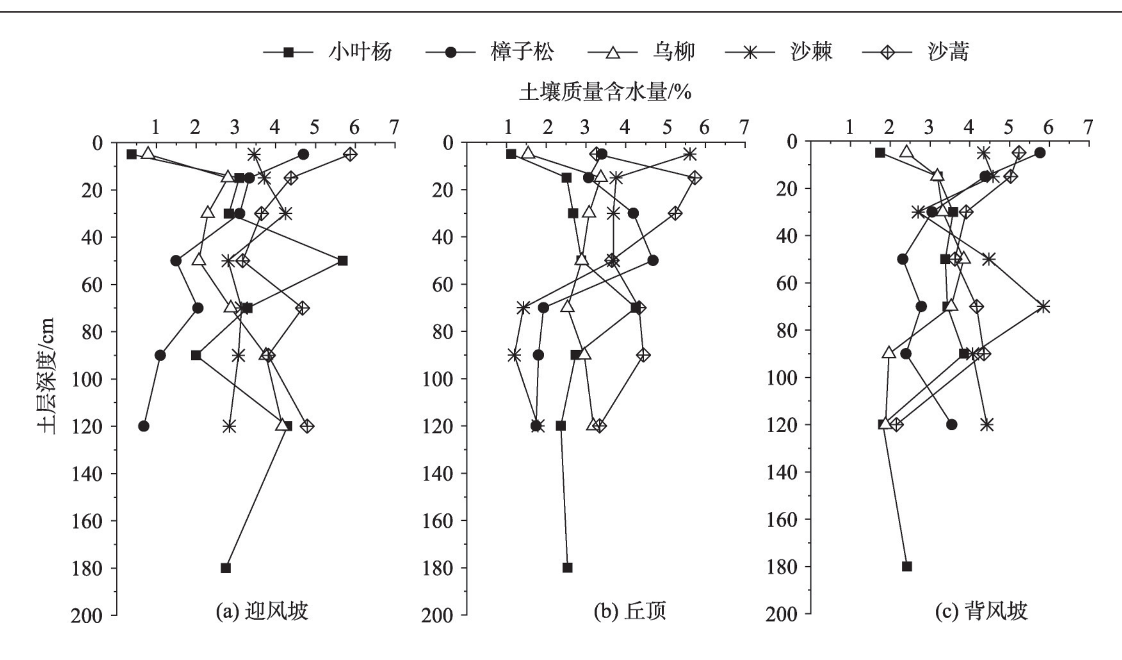


图4 不同植物在不同沙丘地貌部位的土壤含水量的垂直变化(7月)

Fig. 4 Vertical variation of soil moisture content of different plants at different positions of dune in July

来源[23]。此外,土壤水分的季节分布还受到初始土壤含水量、植被的蒸腾作用和土壤的蒸发作用的影响[25-26],因此,在植物生长旺盛季的8月和生长末期的9月,土壤含水量与降水的变化趋势不同步(图2)。5月,地表解冻可迅速补充土壤水分,此时植物处于萌发期,消耗的土壤水分较少。6月植物进入生长初期,土壤含水量下降。7月降水最多,受降水补充,土壤含水量也处于生长季的最高值。进入8月,土壤含水量降至整个生长季的最低值,此时植物蒸腾耗水最多且地表蒸发也最为强烈。9月植物进入生长季末期,蒸腾耗水明显减弱,而且仍有降水补充,土壤含水量达到生长季次高值。总之,土壤水分的季节变化在不同地貌部位之间的规律较为一致,但植株个体的耗水差异导致土壤含水量具有差异性。樟子松下方的土壤含水量最低,这是因为樟子松是常绿乔木,对水分的需求最为旺盛,蒸腾耗水最高,且从图1和表1可知,樟子松的盖度较高,为了维持较高的植被盖度,土壤含水量也下降较快。土壤水分在不同植被恢复措施下的分布与植被类型、栽植模式、造林密度及个体大小都具有相关性。

土壤水分的垂直分布受到降水入渗和植物根系吸水的影响[27]。已有研究表明,本区降水对上层20 cm土壤含水量的影响较为显著,对深层土壤水分的作用减弱[23]。在本研究区,各研究样地10~20 cm的土壤含水量最高,土壤表层细砂和极细砂含量仅占50%左右[28],且结皮发育较弱,所以表层的持水能力不强,水分易于下渗补给下层土壤[23],土壤水分主要通过上层土壤蒸发和植被蒸腾作用而消耗。在土壤垂直剖面上,上层土壤受外界环境影响大,随着深度的增加土壤所受的环境影响减弱[29]。从图4也可看出,降水对地表20 cm的补充较多,除樟子松之外,其他植物10~20 cm土层深度的土壤含水量一般都为最高或者极高值。不同沙丘植被盖度、植物种、表层土壤机械组成、干沙层的厚度等都存在差异,而这些因素都会造成土壤蒸发特性和植被蒸腾作用存在差异。此外,土壤含水量的分层分布与根系具有密切的关系,根系集中分布层处的土壤含水量较低[11,30]。小叶杨和樟子松属于乔木,但小叶杨的根系分布深度在100 cm以下[31],而樟子松的根系集中分布在100 cm以内[32],因而,小叶杨在100 cm以下土壤水分急剧减少,而樟子松20~60 cm减少明显。乌柳根系的主要分布深度为0~50 cm[33],本区乌柳为高杆深栽造林,植物根系向水平方向延伸较广,主要分布在地表100 cm深度以内。沙棘根系具有二态性,吸水的侧根集中分布在地表40 cm以内[34]。沙蒿属半灌木,枝条密集,主根发达,根系集中于50 cm以上,表层根系最为集中[35],与降水入渗补给区一致,土壤含水量相对较为稳定,始终维持在较高的水平。在高寒沙地,土壤水分和

养分都较为匮乏,受季节性降水的影响,地表40 cm的土壤含水量较高,根系也集中分布在此层以获取较高的水分和养分[36]。

植物与土壤水分之间存在复杂而密切的生态关系,一方面植物生长需要消耗充分的土壤水分,促使土壤含水量不断降低[17],另一方面植物通过冠层减少表土蒸发和根系固结水土来防止土壤水分的自然蒸散与风蚀流失。土壤水分影响植被分布格局,同时,植被分布又反作用于土壤水分。比较不同植物的生长特征(表2)与其下方土壤含水量(表3)的相关性可知,两者之间并不能用简单的线性关系来表示,这是因为土壤水分受到地形、土壤性质、植被、地下水深度、降雨量、气象因子等诸多因素的影响,通过植被—土壤系统的生态水文循环和互馈关系,进而表现出高度的时空异质性[37-38]。本研究区人工治理后的沙丘土壤含水量维持在1.81%~3.41%,群落优势种的盖度在14.60%~54.06%之间。自然固定沙丘沙蒿的盖度维持在30%左右,而土壤水分稳定在3%左右,这说明该植被盖度下植被与土壤水分已经达到了动态平衡,植物不仅能充分利用当地的降水,而且能够抑制水分的渗漏,从而将水分储存在较深沙层中。由于不同固沙植物的水分需求与利用效率不同,土壤水分的季节变化和深度变化都表现出物种差异。因此,在未来开展对固沙植物的水分来源与土壤水分的动态变化关系的研究具有重要的意义。

综上所述,不论沙蒿自然分布植物还是小叶杨、樟子松、乌柳、沙棘等人工植物,不仅增加了各土层深度的含水量,也稳定了各深度层的含水量变化,植物的调蓄功能非常明显,且自然恢复植物的土壤水分改良效益优于人工植物,年限越长,植物的水分调控能力会更强。人工植被增加了地表的覆盖度,抑制了土壤水分蒸发,提高了表层土壤含水量,而表层较高的土壤含水量能够有效减少风蚀[39],增加临界起沙风速,从而减少风蚀,这对于植物的初期生长具有积极意义[40]。因而,在沙地治理时,综合考虑物种类型、栽植密度、栽植深度及物种搭配模式等,对于最大化发挥植物防沙固沙的生态功能具有重要的意义。

5 结 论

土壤水分的季节变化受到降水、植被蒸腾作用和地表蒸发的影响,不同植被恢复措施下的分布模式不同,但都表现为7月的土壤含水量最高。同一植物在不同地貌部位的土壤含水量不同,除乌柳的差异明显外,其他植物的差异不明显。不同植物在同一地貌部位的土壤含水量的分布也不同,整体表现为沙蒿在各部位的土壤含水量较高。土壤水分随着深度的变化受到降水入渗和植物根系分布的影响,整体表现为10~20 cm处土壤含水量最高。土壤水分在高寒半干旱沙地不同植被恢复措施下的分布除受到降水、土壤分布、物种类型、植物根系分布的影响之外,还与沙丘微地貌形态具有一定的相关性。

参考文献(References):

[1] Sperry J S, Hacke U G. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type[J]. Functional Ecology, 2002, 16: 367-378.

[2] D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, et al. Global desertification: Drivers and feedbacks[J]. Advance Water Resources, 2013, 51: 326-344.

[3] Li X Y, Yang D W, Zheng C M, et al. Ecohydrology, 2017, DOI: 10. 1007/978-981-10-1884-8_18.

[4] Deng J, Li J, Deng G, et al. Fractal scaling of particle-size distribution and associations with soil properties of Mongolian pine plantations in the Mu Us Desert, China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): doi: 10. 1038/s41598-017-06709-8.

[5] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant Cell and Environment, 1992, 15: 1073-1082.

[6] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文、耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1721-1730. [Li Xiaoyan. Mechanism of coupling, response and adaptation between soil, vegetation and hydrology in arid and semiarid regions[J]. Scientia Sinica Terrae, 2011, 41(12): 1721-1730.]

[7] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 等. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1435-1443. [Li Xinrong, Zhao Yang, Hui Rong, et al. Progress and trend of development of restoration ecology research in the arid regions of China [J]. Progress in Geography, 2014, 33(11): 1435-1443.]

[8] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems[J]. Ecology, 1996, 77: 364-374.

[9] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of Northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert[J]. Science China: Life Science, 2014, 57(5):

539−548.

[10] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217−222. [Li Xinrong, Ma Fengyun, Long Liqun, et al. Soil water dynamics under sand-fixing vegetation in Shapotou area[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 217−222.]

[11] 王翔宇, 张进虎, 丁国栋, 等. 沙地土壤水分特征及水分时空动态分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 222−227. [Wang Xiangyu, Zhang Jinhu, Ding Guodong, et al. Study on the temporal and spacial change of soil water content and soil moisture characteristics of sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 222−227.]

[12] 李振山, 王怡, 贺丽敏. 干旱区沙质草地植被覆盖变化模拟 Ⅰ. 模型[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 417−422. [Li Zhenshan, Wang Yi, He Limin. Simulation method of vegetation coverage in arid sandy grassland I. Models[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(3): 417−422.]

[13] Pan Y X, Wang X P, Jia R L, et al. Spatial variability of surfacce soil moisture content in a revegetated desert area in Shapotou, Northern China [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72: 1675−1683.

[14] 朱玉伟, 陈启民, 刘茂秀, 等. 古尔班通古特沙漠南缘沙丘水分的时空分布特征[J]. 草业科学, 2008, 25(12): 6−11. [Zhu Yuwei, Chen Qimin, Liu Maoxiu, et al. Spatiotemporal distribution of moisture content in sand dunes of the unirrigated forestation along the southern marginal zone of Gurbantunggut Desert[J]. Pratacultural Science, 2008, 25(12): 6−11.]

[15] 鲁瑞洁, 唐清亮, 桑艳礼, 等. 青海湖克土沙区不同类型沙丘土壤水分的动态变化[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 111−115. [Lu Ruijie, Tang Qingliang, Sang Yanli, et al. Dynamic changes of soil moisture in different dunes of Ketu sand land in Qinghai Lake basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(2): 111−115.]

[16] 王俏雨, 田丽慧, 张登山, 等. 高寒沙地柠条群落土壤水分空间分布特征研究[J]. 青海大学学报, 2019, 37(3): 8−15. [Wang Qiaoyu, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Spatial variability of soil water content of *Caragana korshinskii* communities in alpine sandy land[J]. Journal of Qinghai University, 2019, 37(3): 8−15.]

[17] 李少华, 张立恒, 王学全, 等. 高寒灌木固沙区土壤性状与植被生长特征的相关分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1331−1337. [Li Shaohua, Zhang Liheng, Wang Xuequan, et al. Soil properties and shrub growth in an alpine sandy area[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1331−1337.]

[18] 中国科学院兰州分院. 青海湖近代环境的演化和预测[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 2. [Lanzhou Branch Chinese Academy of Sciences. Evolution and Prediction of Environment in Qinghai Lake [M]. Beijing: Science Press, 1994: 2.]

[19] 张登山, 高尚玉, 石蒙沂. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 10. [Zhang Dengshan, Gao Shangyu, Shi Mengyi. Desertification and Its Control in Qinghai Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2009: 10.]

[20] 张登山, 石昊, 魏殿生, 等. 青海湖流域人工治沙措施防风固沙效益初步研究[J]. 地球环境学报, 2010, 3(1): 239−242. [Zhang Dengshan, Shi Hao, Wei Diansheng, et al. Effects of artificial measures on wind-breaking and sand-fixation in Qinghai Lake drainage area[J]. Journal of Earth Environment, 2010, 3(1): 239−242.]

[21] 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 等. 近10年青海湖东沙地人工植被群落特征研究[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2109−2121. [Wu Wangyang, Zhang Dengshan, Tian Lihui, et al. Features of artificial plant communities from the east sand region of the Qinghai Lake over the last 10 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 2109−2121.]

[22] 赵以莲, 周国英, 陈桂琛. 青海湖区东部沙地植被及其特征研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 820−825. [Zhao Yilian, Zhou Guoying, Chen Guichen. Sandy vegetation and its characteristics in east of Qinghai Lake area[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 820−825.]

[23] 鲁瑞洁, 唐清亮, 魏殿生, 等. 青海湖湖东沙地不同沙丘降雨入渗研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 797−803. [Lu Ruijie, Tang Qingliang, Wei Diansheng, et al. Rainwater infiltration at dunes under various rainfall events in sandy land to the east of Qinghai Lake[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(3): 797−803.]

[24] 王正宁, 王新平. 荒漠灌丛树干茎流及其入渗、再分配特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1108−1113. [Wang Zhengning, Wang Xinping. Stemflow of *Caragana korshinskii* and its infiltration and redistribution in desert environment[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5): 1108−1113.]

[25] Pan Y X, Wang X P. Factors controlling the spatial variability of surface soil moisture within revegetated-stabilized desert ecosystems of the Tengger Desert, Northern China[J]. Hydrological Processes, 2009, 23: 1591−1601.

[26] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds[J]. Journal of Hydrology, 1983, 62: 179−200.

[27] 冯起, 高前兆, 苏培玺, 等. 半湿润地区植被影响下的沙地水分动态[J]. 干旱区研究, 1994, 11(4): 58−63. [Feng Qi, Gao Qianzhao, Su Peixi, et al. Study soil water variability of sandy land influencing by vegetation in the semi-humid zone[J]. Arid Zone Research, 1994, 11(4): 58−63.]

[28] 张登山, 田丽慧, 鲁瑞洁, 等. 青海湖湖东沙地风沙沉积物的粒度特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 203−211. [Zhang Dengshan, Tian Lihui, Lu Ruijie, et al. Grain-size features of aeolian deposits in the eastern shore of Qinghai Lake[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 203−211.]

[29] Richards J H, Caldwell M M. Hydraulic lift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots [J]. Oecologia, 1987, 73(4): 486−489.

[30] 石莎, 马风云, 刘立超, 等. 沙坡头地区不同植被结构对沙地土

壤水分的影响[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2004, 13(2): 137−142. [Shi Sha, Ma Fengyun, Liu Lichao, et al. The effect on different vegetation structure to soil water contents in Shapoto region [J]. Journal of Minzu University of China (Natural Sciences Edition), 2004, 13(2): 137−142.]

[31] 孜尔蝶·巴合提, 贾国栋, 余新晓, 等. 基于稳定同位素分析不同退化程度小叶杨水分来源[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1807−1816. [Zierdie Baheti, Jia Guodong, Yu Xinxiao, et al. Assessing water sources for *Populus simonii* with different degrees of degradation based on stable isotopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1807−1816.]

[32] Zhou H, Zhao W Z, He Z B, et al. Variation in depth of water uptake for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* along a precipitation gradient in sandy regions[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 1−11.

[33] 于洋, 贾志清, 朱雅娟, 等. 高寒沙地乌柳(*Salix cheilophila*)林根系分布特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 67−74. [Yu Yang, Jia Zhiqing, Zhu Yajuan, et al. Root distribution of *Salix cheilophila* along a chronosequence in high-cold sandland[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 67−74.]

[34] Wu H W, Li X Y, Jiang Z Y, et al. Contrasting water use pattern of introduced and native plants in an alpine desert ecosystem, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 182−191.

[35] 鲁瑞洁, 刘小槺, 李金凤, 等. 青海湖地区典型固沙植物对根下土壤改良作用的初步研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 177−181. [Lu Ruijie, Liu Xiaokang, Li Jinfeng, et al. Effects of typical sand-fixing plant on soil improvement in Qinghai Lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 177−181.]

[36] 张立恒, 李清雪, 王学全, 等. 高寒沙区中间锦鸡儿人工林细根动态及其周转[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 212−219. [Zhang Liheng, Li Qingxue, Wang Xuequan, et al. Biomass dynamics and turnover of fine rcoots of *Caragana intermedia* plantations in alpine sandy land [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 212−219.]

[37] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 993−1000. [Pan Yanxia, Wang Xinping, Su Yangui, et al. Temporal and spatial variability of surface soil moisture in a re-vegetation desert area in Shapotou [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 993−1000.]

[38] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 881−889 . [Wang Bo, Duan Yuxi, Wang Weifeng, et al. Spatial and temporal variability of soil water content during vegetation succession in sand-binding area[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 881−889.]

[39] 移小勇, 赵哈林, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地不同风沙土的风蚀特征[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 10−13, 53. [Yi Xiaoyong, Zhao Halin, Li Yulin, et al. Wind erosion characteristics of aeolian soils in Horqin sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 20(2): 10−13, 53.]

[40] 孙姗姗, 刘新平, 魏水莲, 等. 沙地植物幼苗生长对降水和风速变化的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 870−877. [Sun Shanshan, Liu Xinping, Wei Shuilian, et al. Response of plant seedling growth to the changes in precipitation and wind velocity in Horqin sandy land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 870−877.]

Variation of soil moisture content in vegetation restoration area of sandy land at east shore of Qinghai Lake

WANG Haijiao[1], TIAN Lihui[1,2], ZHANG Dengshan[1,2], WANG Qiaoyu[1]

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai Academy of Agricultural Forestry Sciences, Qinghai University, Xi'ning 810016, Qinghai, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Spatial-temporal heterogeneity of soil moisture is the main driving force for variation of vegetation patterns and processes in the desert, directly affecting plant growth in arid and semi-arid regions. Here, we used the dunes of planted sand-fixing plants (*Populus sylvestris*, *Pinus sylvestris*, *Hippophae rhamnoides*, and *Salix cheilophila*) at the eastern sandy shore of Qinghai Lake as study site and compared them to natural fixed dunes dominated by *Artemisia ordosica*. Our objectives were to analyze how soil's moisture and geomorphological features influence the plants' distribution in alpine semi-arid sandy lands. Our results showed that: (1) Precipitation, vegetation transpiration, soil's surface evaporation were the main environmental features affecting soil's seasonal moisture content, that varied among species, but that was the highest in July; (2) Depending on the dune's position, soil moisture content might be different, even for the same species: *Populus simonii* had the most increased soil's moisture content windward, while *P. sylvestris*, *H. rhamnoides*, and *S. cheilophila* had the most increased soil's moisture content when leeward, and *A. ordosica* had the highest soil's moisture content at dune's top. However, geomorphology only played a significant difference in soil's moisture content for *S. cheilophila* ($P<0.05$). Soil's water content for different species in the same position was also different: At the windward, soil's water content for *P. sylvestris* was 1. 81% and that of *A. ordosica* was 3.48%. At the dune's top, the soil's water content for *S. cheilophila* was 1. 82%, while that for *A. ordosica* was 3.58%. There was no significant difference in soil's moisture content among species at the leeward, but that for *S. cheilophila* was 3.41%; (3) Soil's moisture varied with depth and was the highest at 10–20 cm. The soil's moisture vertical distribution also varied according to the plant species: it increased with depth with *P. simonii* and *H. rhamnoides*, while it gradually decreased with increasing soil depth for the other species. The soil's water content decreased with soil's depth for *P. sylvestris* and *P. sylvestris*, while it showed no noticeable change with *H. rhamnoides* and *A. sylvestris* up to 120 cm in depth. A varying soil's water content was observed with *S. cheilophila* in different geomorphological positions and soil layers, which showed that no obvious change on the windward, lowering of the chest and increasing of the leeward. The soil's moisture content distribution with different vegetation restoration measures in alpine semi-arid sandy land was affected by precipitation, soil distribution, species type, plant root distribution, and dunes' micro-topography.

Keywords: alpine semi-arid sandy land; sand-fixing plants; soil moisture; seasonal variation; vertical change; Qinghai Lake